

Modélisation du procédé de perçage assisté par vibrations

M. LADONNE^a, M. CHERIF^a, Y. LANDON^b, J. Y. K'NEVEZ^a, O. CAHUC^a, C. DE CASTELBAJAC^c

a. Université de Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

b. Institut Clément Ader, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse

c. MITIS SAS, 12 rue Johannes Gutenberg, 44340 Bouguenais

Résumé :

Les exigences de performance de l'industrie aéronautique demandent d'améliorer sans cesse les procédés d'usinage pour respecter simultanément la qualité, le coût et le délai de fabrication. L'un des principaux freins à l'amélioration de la productivité en perçage est l'évacuation des copeaux. Pour répondre à cette problématique, de nouveaux procédés ont vu le jour, tels que le perçage assisté par vibrations. En ajoutant des oscillations axiales au mouvement d'avance de l'outil, il est possible de fractionner les copeaux générés pour favoriser leur évacuation. Cette technologie introduit deux nouveaux paramètres opératoires supplémentaires, l'amplitude et la fréquence des oscillations, qu'il est nécessaire de déterminer judicieusement pour optimiser le procédé. Cette optimisation nécessite la modélisation fine du perçage assisté par vibrations. Cet article présente la mise en place d'un modèle cinématique qui permet une modélisation de la morphologie des copeaux fractionnés et une quantification du phénomène de talonnage.

Abstract :

Expected performances of the aeronautic industry, require to improve constantly the machining process. One of the obstacles to increase productivity of drilling is the chip evacuation. To solve this problem, new methods are emerging, such as vibrations assisted drilling. Adding oscillation to the tool's motions, enable to split chips to facilitate their evacuation. This technology introduces two new operating parameters. To optimize the process, the choice of parameters requires to model the vibratory cutting. This paper presents a model to predict chip morphology in vibrations assisted drilling. This model can also identify the presence of plowing phenomenon.

Mots clefs : Perçage vibratoire, Perçage assisté par vibrations, Modélisation, Talonnage.

1 Introduction

Dans le domaine aéronautique, le perçage est souvent l'une des dernières opérations pratiquées sur des pièces à très forte valeur ajoutée. L'erreur n'est donc pas envisageable et les enjeux industriels imposent constamment de gagner en fiabilité et en productivité. Or en raison de la géométrie de l'outil employé, du mouvement de ce dernier et du confinement de l'opération, la maîtrise du perçage n'est pas triviale. Il est notamment nécessaire de garantir le fractionnement et l'évacuation des copeaux générés par la coupe.

1.1 L'évacuation des copeaux en perçage

Dans le cas du perçage, l'évacuation des copeaux formés par la coupe se fait par les goujures aménagées dans le corps du foret. Dans certains matériaux aéronautiques tels que le titane ou l'aluminium, les copeaux forment de longues spirales hélicoïdales occupant le maximum de l'espace des goujures de l'outil. Ils peuvent alors conduire à un phénomène de bourrage. Il y a dans ce cas, un risque de détérioration de la surface usinée et/ou d'endommagement de l'outil. L'évacuation de la matière est donc un facteur clé pour fiabiliser le procédé.

Dans ce but, des solutions ont été développées pour faciliter l'évacuation des copeaux. On peut citer notamment l'emploi d'outils avec géométrie "brise copeau" [1], le choix des revêtements d'outils [2] adaptés, ou la mise en place d'une lubrification haute pression [2]. Une autre alternative consiste à modifier la cinématique de l'outil pour créer une coupe discontinue. Pour cela, Denkena, [3], propose d'opter pour le perçage orbital. Il est également possible de dégager le foret suivant la direction axiale, comme c'est le cas dans un cycle de déburrage ou en perçage assisté par vibrations [2]. Cette étude portera sur cette dernière solution.

1.2 Le perçage assisté par vibrations

Le perçage assisté par vibrations, ou perçage vibratoire, consiste à ajouter aux mouvements conventionnels de l'outil une oscillation axiale pour créer un micro déburrage entraînant la brusque modification ou l'arrêt du phénomène de coupe et donc la rupture du copeau. Le mouvement vibratoire peut ainsi être envisagé de deux façons différentes.

Une première solution consiste à générer des oscillations de faible amplitude ($<20\mu\text{m}$) à haute fréquence ($>5\text{kHz}$). Ces oscillations dites "ultrasoniques" sont obtenues par des actionneurs piézo-électriques. Sans ressortir de la matière, les vibrations font varier l'épaisseur de coupe et créent des amorces de rupture du copeau [4], [5].

La deuxième approche consiste à générer une oscillation de basse fréquence ($<1\text{kHz}$) dont l'amplitude est proche de l'avance. Dans cette seconde catégorie, les technologies employées sont plus nombreuses. Il est possible de générer les vibrations en imposant un mouvement d'oscillation par des systèmes piézo-électriques [6], un train d'engrenages excentriques, [7] ou des systèmes à cames [8]. On parle alors de perçage assisté par vibrations forcées. Il est également possible de profiter du broutement que l'on rencontre à grande vitesse, pour générer et entretenir les oscillations [2]. Le perçage vibratoire auto-entretenu récupère son énergie dans la coupe, mais nécessite une maîtrise et une régulation parfaite des conditions opératoires, difficilement applicables dans un contexte industriel.

Dans ces travaux, nous nous intéresserons au perçage vibratoire assisté par vibrations forcées à basse fréquence. La société MITIS commercialise un porte-outil vibratoire basé sur un roulement à bagues sinusoïdales [8]. Les oscillations sont obtenues par la rotation relative des deux bagues, l'une étant entraînée par la broche, l'autre étant fixe par rapport au bâti. Le déphasage des deux bagues permet de régler l'amplitude des vibrations. La fréquence est déterminée par le nombre d'oscillations sur les bagues. Le système tire son énergie du mouvement de la broche. Son adaptabilité et sa simplicité permettent une utilisation industrielle. L'amplitude (A) et la fréquence des oscillations (v) introduites par le porte-outil MITIS modifient la trajectoire des arêtes et la dynamique de la coupe. L'optimisation de ces paramètres nécessite une modélisation fine de la cinématique de la coupe dans le cadre du perçage vibratoire

1.3 La modélisation du perçage assisté par vibrations

L'étude du perçage vibratoire et de sa modélisation ont donné lieu à de nombreux travaux, en particulier Guibert[2] et Bondarenko[9] qui ont développé des modèles pour le perçage vibratoire auto-entretenu. Toutes les études réalisées mettent en évidence l'importance du phénomène de talonnage dans le cadre du perçage vibratoire. Le phénomène de talonnage est l'interaction entre l'outil et la matière due au contact entre la surface de dépouille de l'outil et le profil de la matière fraîchement usinée en fond de trou. Jallageas [10] a développé un modèle pour le perçage vibratoire à cinématique imposée. Mais ce premier modèle ne tient pas compte du talonnage. Au regard de ces différents travaux, on se rend compte qu'il est nécessaire de développer un modèle pour le perçage à cinématique imposée qui tienne compte du phénomène de talonnage.

1.4 Objectif des travaux

Afin d'améliorer l'évacuation des copeaux en perçage, l'assistance vibratoire du porte-outil MITIS permet de fractionner les copeaux générés par la coupe. Cependant, cela introduit deux nouveaux paramètres opératoires. Pour déterminer ces nouveaux paramètres, nous cherchons à mettre en place une modélisation du procédé. Au regard des travaux déjà effectués dans ce domaine, il faut être particulièrement vigilant au phénomène de talonnage et à son intégration dans la modélisation. Ce document présente donc un nouveau modèle du procédé de perçage assisté par vibrations à cinématique imposée permettant de prédire la morphologie des copeaux en tenant compte du talonnage. Une identification des zones de variations admissibles pour les paramètres vibratoires sera également présentée.

2 Modélisation cinématique du perçage assisté par vibrations

L'objectif du perçage assisté par vibrations est de fractionner les copeaux pour permettre de faciliter leur évacuation. Pour répondre à cet objectif, notre modèle a pour but de déterminer la morphologie du copeau en fonction des paramètres opératoires qui sont : le choix de l'outil, l'avance (f), la fréquence de rotation (N), l'amplitude des vibrations (A) et la fréquence d'oscillation (v). Un second objectif du modèle est l'identification de la présence ou non du phénomène de talonnage en fonction de la géométrie de l'outil. Pour répondre à ces différents objectifs, le modèle est structuré de la façon suivante :

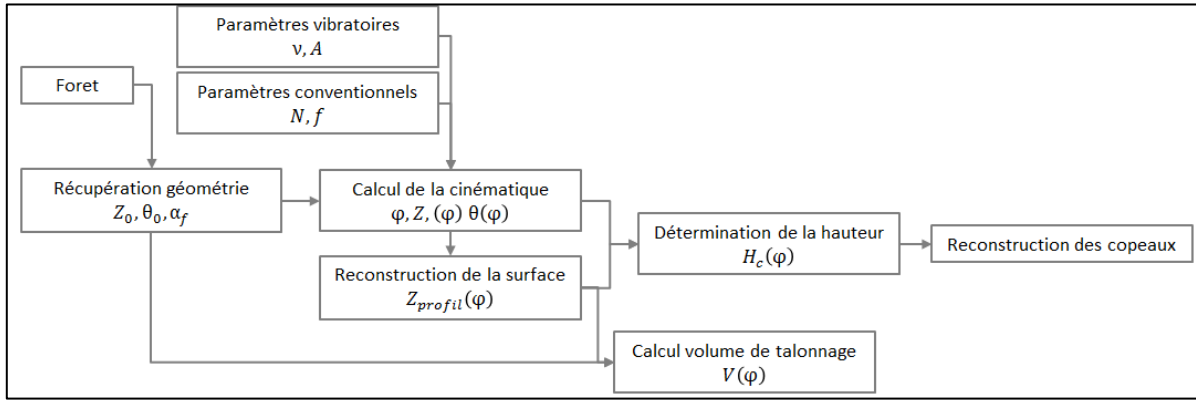


Figure 1 : Structure du modèle.

2.1 Morphologie des copeaux

Le copeau résulte de la coupe de la matière par le foret, il est donc nécessaire de tenir compte de la géométrie de l'outil. Pour cela, on procède à une série de mesure sur l'outil. On mesure ainsi les coordonnées des points de l'arête ainsi que les angles définis par la norme ISO 3002-1. Nous sommes ainsi capables de reconstruire numériquement l'outil. Nous prendrons ici en exemple un foret hélicoïdal de diamètre (D) 12, à 2 lèvres (N_z).

La cinématique de l'outil, dans le cas du perçage assisté par vibrations forcées, est donnée par le mouvement de la broche et du porte outil. Dans ses travaux [10], Jallageas met en équation le mouvement de l'outil en analysant la cinématique du dispositif MITIS. En raison de l'aspect purement cinématique, nous exprimerons l'ensemble des données en fonction de la rotation de l'outil φ et du temps t .

$$\varphi(t) = \frac{2\pi \cdot N \cdot t}{60} \quad (1)$$

On exprimera alors la fréquence d'oscillation en nombre d'oscillations par tour (W) :

$$W = \frac{v \cdot 60}{N} \quad (2)$$

On pose alors les équations régissant le mouvement des points (de position radiale r) des arêtes de coupe :

$$Z_{arête}(r, \varphi) = Z_0(r) - \frac{f}{2\pi} \cdot \varphi - \frac{A}{2} \sin(W \cdot \varphi) \quad (3)$$

$$\theta_{arête}(r, \varphi) = \theta_0(r) - \varphi \quad (4)$$

Si l'on trace les trajectoires des différentes arêtes, on obtient alors un graphique (Figure 2) sur lequel on déduit le volume de matière qui va être enlevé.

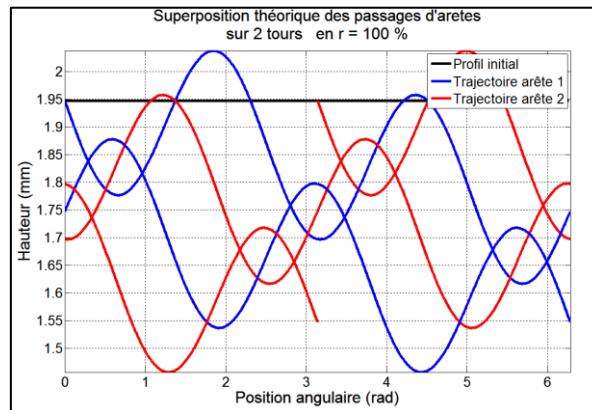


Figure 2 : Superposition des passages des arêtes.

L'étape suivante du modèle consiste à calculer la hauteur de matière coupée (H_c) à chaque instant. Pour déterminer la hauteur de coupe instantanée, Toews, dans ses travaux [11], propose la modélisation suivante :

$$H_c(\varphi) = \frac{f}{N_z} + A \left(\sin\left(\frac{W \cdot \pi}{N_z}\right) \cdot \cos\left(W \cdot \varphi - \frac{W \cdot \pi}{N_z}\right) \right) \quad (5)$$

Cependant la relation n'est valable que si l'outil ne ressort pas de la matière. Or si l'on veut assurer le fractionnement des copeaux, il peut être nécessaire de créer une coupe discontinue.

$$Z_{surface}(r, \theta_{arête}(r, \varphi)) = \min[Z_{arête}(r, \varphi), Z_{surface}(r, \theta_{arête}(r, \varphi))] \quad (6)$$

On obtient alors la hauteur de matière coupée par la différence entre la hauteur de la surface générée précédemment et la hauteur de l'arête : (Figure 3)

$$H_c(r, \varphi) = \begin{cases} Z_{surface}(r, \theta_{arête}(r, \varphi)) - Z_{arête}(r, \varphi) & \text{si } Z_{surface} > Z_{arête} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (7)$$

En appliquant le modèle en tout point de l'arête, il est alors possible de reconstruire en trois dimensions le volume de matière coupée (Figure 4), ce qui préfigure la morphologie du copeau.

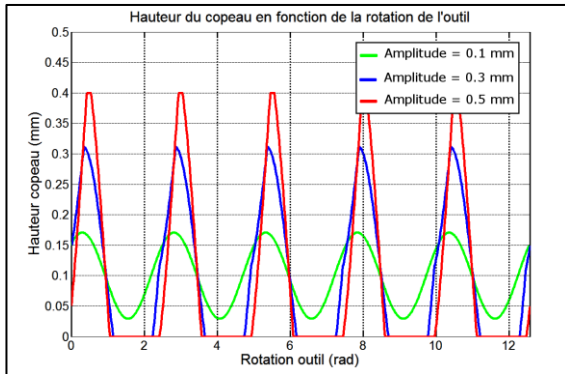


Figure 3 : Hauteur de coupe pour différentes amplitudes

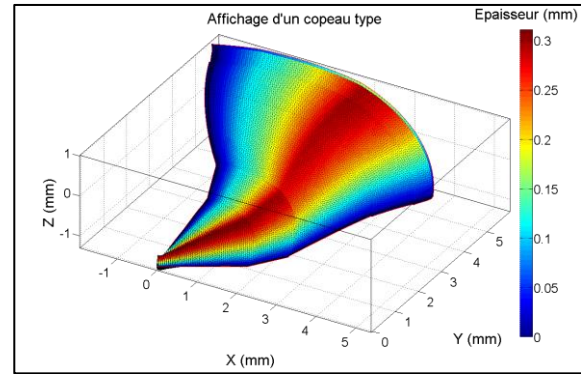


Figure 4 : Affichage d'un copeau type.

2.2 Talonnage

Comme évoqué dans la section 1, il est important de quantifier et de localiser le talonnage. Dans les travaux menés en perçage assisté par vibrations, plusieurs méthodes sont proposées pour déterminer la présence de talonnage. Dans ses travaux [12], Moraru étudie la valeur de l'angle de dépouille effectif le long de l'arête de coupe. Guibert [2] étudie la hauteur entre la surface de dépouille, schématisée par une arête fictive, et la matière. Chang [4], quant à lui, détermine le volume d'intersection entre la dépouille et la matière. Les résultats obtenus par ces trois méthodes sont très similaires lorsque le talonnage est amorcé au niveau de l'arête de coupe. Si le talonnage apparaît à l'autre extrémité de la dépouille (Figure 6), seule la troisième méthode décèle le talonnage. Nous ferons donc le choix de mettre en place une méthode par calcul de volume, qui est plus lourde en termes de calcul, mais qui permet de renvoyer une seule grandeur globale pour quantifier le talonnage.

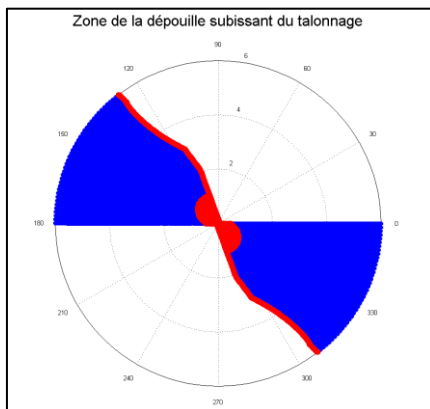


Figure 5 : Empreinte du talonnage (rouge) sur la surface de dépouille primaire (bleu).

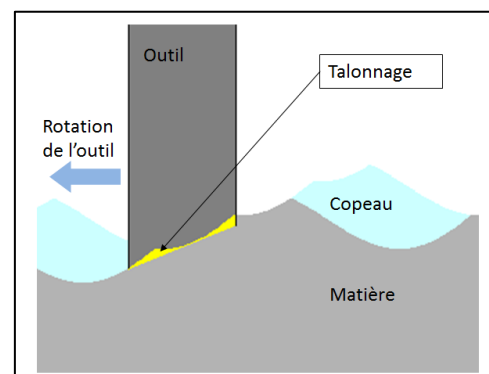


Figure 6 : Phénomène de talonnage

La détermination du volume intersection entre la surface de dépouille et la pièce est obtenue par intégration de la hauteur entre la surface de dépouille et la surface générée en chaque point de la dépouille selon la relation suivante : (Eq (10)).

$$h_t(r, \theta, \varphi) = \begin{cases} Z_{surface}(r, \theta, \varphi) - Z_{dépouille}(r, \theta, \varphi) & \text{si } Z_{dépouille} < Z_{surface} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (8)$$

avec : $Z_{dépouille}(r, \theta, \varphi) = Z_{arête}(r, \varphi) + \tan(\alpha_f(r)) \cdot \theta \cdot r \quad (9)$

$$V_{talonnage}(\varphi) = \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{\theta_{max}(r)} h_t(r, \theta, \varphi) \cdot d\theta \cdot dr \quad (10)$$

On obtient ainsi une valeur quantitative du talonnage ($V_{talonnage}$). Il est également possible d'étudier la localisation du phénomène en regardant les zones de la dépouille primaire subissant du talonnage durant le perçage (Figure 5).

Le modèle développé permet donc d'obtenir la morphologie du copeau en fonction des conditions opératoires. Il permet également d'étudier le phénomène de talonnage en fonction de la géométrie de l'outil utilisé.

3 Analyse cinématique des conditions opératoires

L'objectif global de la modélisation proposée est de déterminer les paramètres opératoires optimaux pour le dispositif vibratoire. Pour cela, il convient de définir le comportement attendu du procédé : Il est nécessaire d'obtenir le fractionnement des copeaux tout en limitant les surcharges outils en termes de chocs et d'avance instantanée pour garantir la tenue de l'outil de coupe.

3.1 Rupture des copeaux

Des études ont été menées sur les conditions opératoires permettant le fractionnement des copeaux en perçage assisté par vibrations forcées [11], [13]. Le fractionnement théorique est obtenu lorsqu'il y a une coupe discontinue. D'après les travaux de Deyuan [13], cette limite peut être définie par :

$$A \geq \frac{f}{2 \cdot \left| \sin\left(\frac{W \cdot \pi}{2}\right) \right|} \quad (11)$$

Dans ce cas, la sortie de l'outil de la matière permet de s'assurer du fractionnement des copeaux.

3.2 Endommagement de l'outil

Cependant, si il y a sortie cyclique de la matière, il y aura également des rentrées cycliques dans la matière qui peuvent endommager l'outil par chocs. Pour préserver l'outil d'un endommagement trop rapide, il est préférable d'éviter les bonds de l'arête hors de la matière [10]. De même le frottement de la dépouille de l'outil contre la surface en fond de trou, lorsqu'il y a talonnage, peut être dommageable pour l'outil et la matière. Nous chercherons donc, dans un premier temps, à limiter le talonnage.

Si on fait la synthèse des trois conditions de bon fonctionnement du perçage assisté par vibrations, il faut alors être à la fois au-dessus et en dessous de la limite définie dans l'équation (11). Pour répondre aux deux premières, qui paraissent contradictoires, il faut rester sur la limite définie par Deyuan.

En maintenant une avance instantanée dans la plage préconisée par le constructeur de l'outil, on se rend compte que le talonnage reste souvent limité dans une très petite zone au centre de l'outil (Figure 5). Le talonnage au centre de l'outil, que l'on appelle parfois "indentation", est inévitable en raison de la vitesse tangentielle qui tend vers zéro en se rapprochant du centre [14]. Donc le talonnage est, dans le cas du perçage assisté par vibrations à cinématique forcée, un facteur qui n'est généralement pas limitant (équation (12)).

$$A \leq \frac{2\pi \cdot r_{limite} \cdot \tan(\alpha_f(r_{limite})) - f}{W \cdot \pi} \quad (12)$$

4 Conclusion et perspectives

Le perçage assisté par vibration est un procédé permettant la maîtrise dimensionnelle des copeaux afin d'améliorer leur évacuation. Cela permet de fiabiliser la réalisation de perçages. De nombreux travaux ont été menés sur la faisabilité et la modélisation d'un tel procédé. En se basant sur ces différents travaux, nous avons développé notre modélisation du procédé développé par la société MITIS. Ce modèle permet d'établir

un lien entre les paramètres opératoires et la morphologie des copeaux, dans le but de déterminer les paramètres de bon fonctionnement du procédé.

Cette étude reste cependant purement cinématique. Cela ne fonctionne donc bien qu'avec un environnement contrôlé comme on dispose en laboratoire. Pour tenir compte des phénomènes dynamiques, en particulier des différents amortissements présents dans la chaîne cinématique, la modélisation des efforts de coupe est indispensable. La prochaine étape du développement envisagée pour la modélisation consiste donc à la mise en place d'un modèle de coupe adaptable au perçage vibratoire selon le schéma (Figure 7).

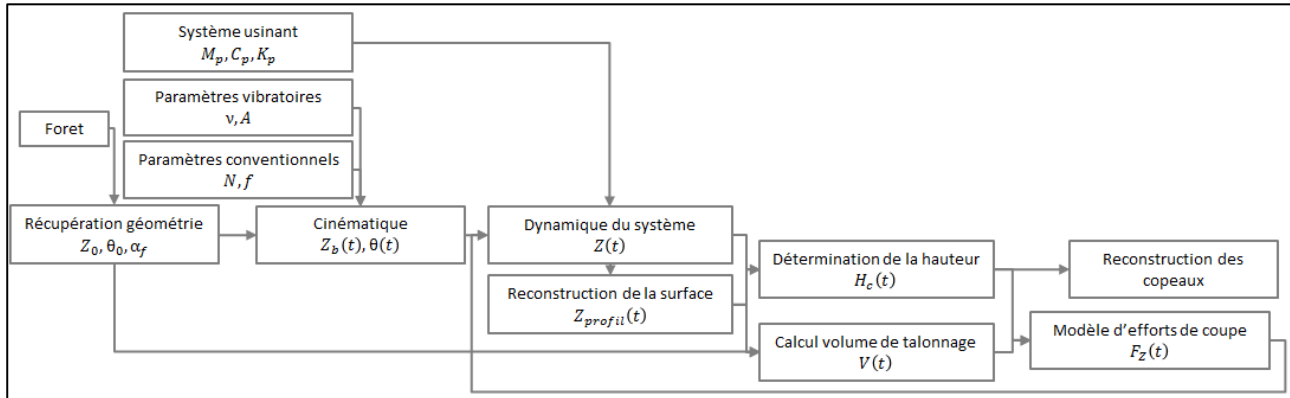


Figure 7 : Perspectives du modèle.

Ce travail a été conduit dans le cadre du groupe de travail Manufacturing 21 qui regroupe 18 laboratoires de recherche français. Les axes étudiés sont : la modélisation des interactions outil/matière, le comportement mécanique des structures articulées, l'usine numérique, les procédés innovants et durables.

Références:

- [1] L. Benezech, Y. Landon, et W. Rubio, "Study of Manufacturing Defects and Tool Geometry Optimisation for Multi-Material Stack Drilling", *Advanced Materials Research*, 1-11, 2012.
- [2] N. Guibert, "Etude et modélisation de l'influence des phénomènes de coupe sur les performances du forage vibratoire", Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, 2008.
- [3] B. Denkena, D. Boehnke, et J.H. Dege, "Helical milling of CFRP–titanium layer compounds", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008.
- [4] S.S.F. Chang et G.M. Bone, "Thrust force model for vibration-assisted drilling of aluminum 6061-T6", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1070-1076, 2009.
- [5] R. Neugebauer et A. Stoll, "Ultrasonic application in drilling", *Journal of Materials Processing Technology*, 633-639, 2004.
- [6] G.F. Moraru, P. Veron, et P. Rabate, Brevet FR2944722B1, "Tête de perçage à vibrations axiales".
- [7] G.F. Moraru et D. Brun Picard, Brevet FR2892959B1, "Dispositif de perçage à oscillations axiales".
- [8] G. Peigne, Brevet FR2902848B1, "Roulement à bague, à déplacement axial et outillage de façonnage équipé d'un tel roulement".
- [9] D. Bondarenko, "Etude mésoscopique de l'interaction mécanique outil/pièce et contribution sur le comportement dynamique du système usinant", Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble et Université Technique Bauman de Moscou, 2010.
- [10] J. Jallageas, M. Chérif, J.-Y. K'nevez, et O. Cahuc, "Modélisation du perçage vibratoire sur UPA", 20^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2011.
- [11] H.G. Toews, W.D. Compton, et S. Chandrasekar, "A study of the influence of superimposed low-frequency modulation on the", *Precision Engineering*, 1998.
- [12] G.F. Moraru, "Etude du comportement du système 'pièce-outil-machine' en régime de coupe vibratoire", Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers et Université Polytechnique de Bucarest, 2002.
- [13] Z. Deyuan et W. Lijiang, "Investigation of chip in vibration drilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 165-176, Feb. 1998.
- [14] M. Bono et J. Ni, "The Indentation Zone of a Twist Drill", 29th North American Manufacturing Research Conference, 2001.